

Heinol et al., "Photomischdetektor Graps 3D-Pictures"

"Photonic Mixer Device detects 3D Images"

A sensor, the so-called photonic mixer device (PMD) is
5 described. It may simultaneously perform a signal
multiplication by an inputted control voltage, additionally
to the radiation detection. By integrating the mixing process
and the correlation process into the detector, a surprisingly
easy overall new solution results. Due to this ability, it is
10 therewith possible to directly "see" distance values.

A PMD pixel detects the echo propagation times of
modulated light signals, like a laser radar. An image sensor
is generated by means of a laminar pixel arrangement like in
15 the case of CCD, or CMOS cameras which sensor, however, is
able to additionally detect the depth information of a 3D
scene, due to the features of each of its image elements.

The phase state of a light wave emitted by the light
source is measured, after passing the measuring length. This
20 takes place by multiplication, or homodyne mixing, and
subsequent integration. This process corresponds with a
correlation of the transmission modulation signal with an
internal reference signal, and takes place within the PMD
pixel.

25 The operating mode may be identified, with the help of
the basic structure shown in figure 3. Figure 3a shows a cut
through the chip: One identifies a pair of transparent photo
gates (also named as modulation gates) which pair
30 simultaneously defines the light-sensitive detector region.
In the immediate vicinity, there respectively is a read-out
diode which serves as interface to the downstream, pixel-
associated read-out circuit. This feature firstly connects

the PMD with the class of Active-Pixel-Sensors.

The semiconductor region below the two photo gates, however, operates in the so-called "deep depletion mode", - like the CCD mode - and forms the light-sensitive pixel region which is responsible for detecting the incoming light, as well as for the multiplication being necessary for measuring the distance. Additionally to generating the charge carriers, a potential gradient is generated in the region below, by applying a push-pull modulation voltage $\pm U_m$ of some 100 mV to the two photo gates. Depending on the polarity, the potential gradient directs the charge carriers either to the left or to the right read-out diode (figure 3b). The time variable potential characteristic caused by the modulation voltages corresponds to an electron swing which, depending on its present position, decides whereto the generated electron flows. The mentioned mixing effect is based on this charge carrier separation.

Horst G. Heinol, Prof. Dr.-Ing. Rudolf Schwarte XP-000913168

„Photomischdetektor“ V2087 erfaßt 3D-Bilder

© p.d. 15-06-1999

Neues optisches Bauelement vereinigt Detektion und Mischung

$$p. 80 + 82 + 84 + 86 + 88 + 90 = 6$$

Normale optische Sensoren registrieren nur die Helligkeit von Punkten, Zeilen oder zweidimensionalen Bildern. Es fehlt immer die räumliche Dimension. Um sie zu erfassen, kann man die Laufzeit des Lichtes zwischen Lichtquelle, Objekt und Empfänger auswerten. Was bisher einen hohen Schaltungsaufwand erforderte, wird durch ein neuartiges Bauelement, den „Photomischdetektor“, jetzt wesentlich vereinfacht.

heute möglich. Photosensoren und komplexe Schaltungen als komplette Detektoreinheit auf einem Chip zu realisieren. Solche, allgemein als Opto-ASICs bezeichnete, monolithisch integrierte Strukturen werden in Form von „Active-Pixel-Sensoren“ (APS) [1] für CMOS-Kameras seit einigen Jahren intensiv untersucht und erleben derzeit ungeahnte Fortschritte, die sie sogar zu ernstzunehmenden Konkurrenten der seit ca. 20 Jahren eingeführten und etablierten CCD-Kameras machen [2]. Durch diese Möglichkeit entstehen Sensoren mit erhöhter Funktionalität oder sogar ganz neue Sensortypen, deren Arbeitsweise wesentlich erweiterte Perspektiven eröffnet.

Ein solcher Sensor ist der sogenannte Photomischdetektor (Photonic Mixer Device, PMD), der zusätzlich zur Strahlungsdetektion gleichzeitig auch eine Signalmultiplikation mit einer eingegebenen Steuerspannung vornehmen kann.

Bilderaufnahmegeräte sind aus modernen industriellen Automatisierungsprozessen kaum mehr weg zu denken. Beim schnellen und berührungslosen Vermessen von Objekten bzw. Objektpunkten sind sie praktisch konkurrenzlos. Sie verwenden optische Sensoren, die einzelne Punkte, Zeilen oder ganze Bilder in elektrische Signale umwandeln, welche dann mit einem Rechner weiterverarbeitet werden können.

Herkömmliche Systeme liefern allerdings nur maximal zweidimensionale Bilder, also unvollständige Informationen, da die Tiefeninformation der 3D-Realität durch Projektion verlorengeht. Auf der Triangulation beruhende Verfahren, bei denen der Punktabstand über Winkelpeilung von getrennten Positionen aus – z.B. von zwei Kameras – ermittelt wird, können trotz beachtlicher Fortschritte viele Anforderungen typischer Applikationen nicht erfüllen.

Eine Lösung dieses alten Problems bringt jetzt ein neuartiges Halbleiterbauelement. In CMOS-Technologie ist es

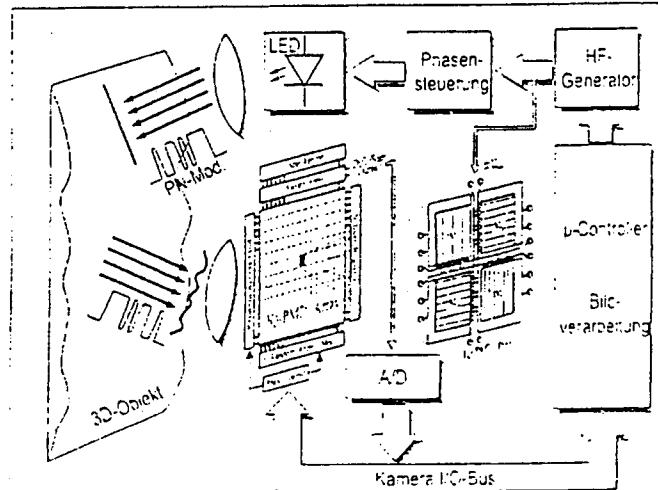


Bild 1. Aufbau eines Meßsystems mit PMD: Das Empfänger-Array registriert nicht nur ein zweidimensionales Bild, sondern ermittelt über die Laufzeit des Lichtes auch eine Tiefeninformation.

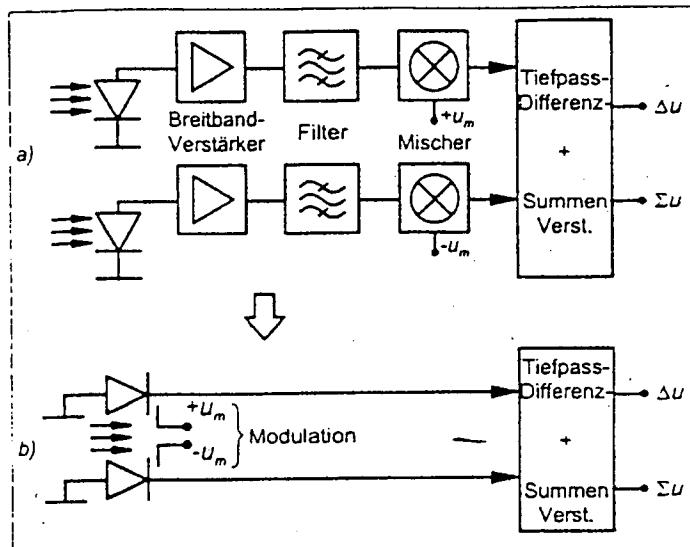


Bild 2. Zwei Arten der optischen Entfernungsmessung mit Hilfe der Echolaufzeit: a) konventioneller diskreter Aufbau; b) Integration im PMD.

Indem der bislang extern durchgeführte Misch- und Korrelationsprozeß hier mit in den Detektor integriert wird, ergibt sich eine überraschend einfache Gesamtlösung. Aufgrund dieser Fähigkeit ist es damit möglich, Entfernungswerte direkt zu „sehen“.

Die grundlegende Idee dafür wurde an der Universität Siegen erarbeitet [7]. Als Ausgründung entstand daraus die Firma S-TEC GmbH in Siegen, die die Entwicklungsarbeiten gemeinsam mit ihren Industriepartnern Temic, DaimlerChrysler-Forschung und aicoss sowie der Universität anwendungsorientiert durchführt.

Laufzeitmessung mit PMD-Pixeln

Ein PMD-Pixel detektiert die Echolaufzeiten von modulierten Lichtsignalen ähnlich wie ein Laser-Radar. Bild 1 zeigt die komplette Versuchsanordnung, bestehend aus einer modulierten Lichtquelle und einem optischen Empfänger mit mehreren PMD-Pixeln. Durch eine flächenhafte Pixelanordnung wie bei CCD- bzw. CMOS-Kameras entsteht ein Bildsensor, der jedoch aufgrund der Eigenschaft jedes seiner Bildelemente in der Lage ist, zusätzlich die Tiefeninformation einer 3D-Szene zu erkennen.

Gemessen wird der Phasenzustand einer von der Lichtquelle ausgesendeten und z.B. mit Pseudorauschen intensitätsmodulierten Lichtwelle nach Durchlaufen der Meßstrecke, d.h. vom Sender zum Meßobjekt und zurück zum PMD-Empfänger [3]. Dies geschieht durch eine Multiplikation bzw. homodyne Mischung und anschließende Integration. Dieser Prozeß entspricht einer Korrelation des Sendemodulationssignals mit einem internen Referenzsignal und findet innerhalb des PMD-Pixels statt.

Das Prinzip des Echolaufzeit-Verfahrens ist nicht neu – allerdings elektronisch höchst anspruchsvoll. Denn für eine Abstandsmessung auf einen Millimeter genau ist die zugehörige, extrem kurze Echolaufzeit mit einer Auflösung von 6,6 ps zu messen. Konventionelle Systeme dieser Art

sind bisher derartig aufwendig, teuer und fehlerkritisch, daß nur eindimensionale Abstandsmeßgeräte und rotierende 1D-Scanner kommerziell eingeführt werden konnten. Bild 2a zeigt schematisch deren Empfangskette aus Photodioden, Breitbandverstärkern, elektronischen Mischern und diversen Filtern. Bild 2b im Vergleich dazu ein System mit einem PMD. Dessen elektrisches Symbol entspricht vereinfacht der in Bild 3 gezeigten Struktur mit den beiden – vorzugsweise im Gegenakt betriebenen – elektronischen Modulationseingängen, den beiden Mischerausgängen und einem optischen Eingang. An dieser Gegenüberstellung wird deutlich, daß das PMD nicht etwa nur eine mikroelektronisch hochintegrierte Version der für diese Funktion üblicherweise benötigten Schaltungskomponenten ist, sondern vielmehr ein neues optoelektronisches Bauelement mit direkter inhärenter Multiplikation bzw. Korrelation.

Mischung direkt im Pixel

Anhand der in Bild 3 dargestellten Grundstruktur läßt sich die Funktionsweise erkennen. Bild 3a zeigt einen Schnitt durch den Chip: man erkennt ein Paar transparenter Photogates (auch Modulationsgates genannt), das gleichzeitig den lichtempfindlichen Detektorbereich defi-

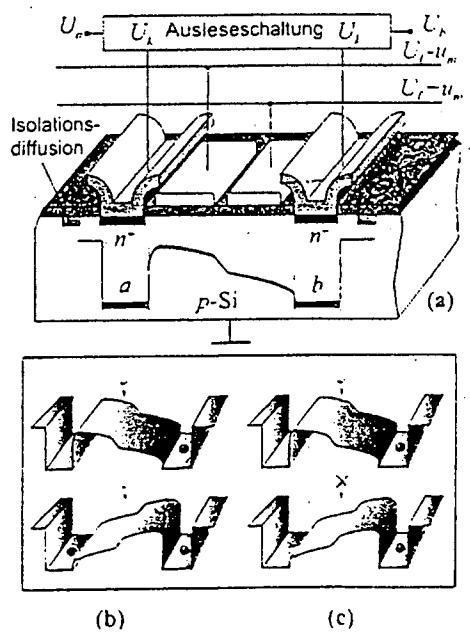


Bild 3.
Das Grundprinzip des PMD:
a) Struktur des Chips;
b) Potentialverlauf als „Elektronschaukel“ für konstante Lichteinstrahlung;
c) Potentialverlauf als „Elektronschaukel“ für moduliertes Licht.

niert. In direkter Nachbarschaft befindet sich jeweils eine Auslesediode, welche als Schnittstelle zur nachgeschalteten, pixelzugehörigen Ausleseschaltung dient. Diese Eigenschaft verbindet das PMD zunächst mit der Familie der Active-Pixel-Sensoren.

Der Halbleiterbereich unter den beiden Photogates arbeitet jedoch im sogenannten „deep depletion mode“ – ähnlich dem CCD-Betrieb – und bildet den lichtempfindlichen Pixelbereich, der sowohl für die Detektion des einfall-

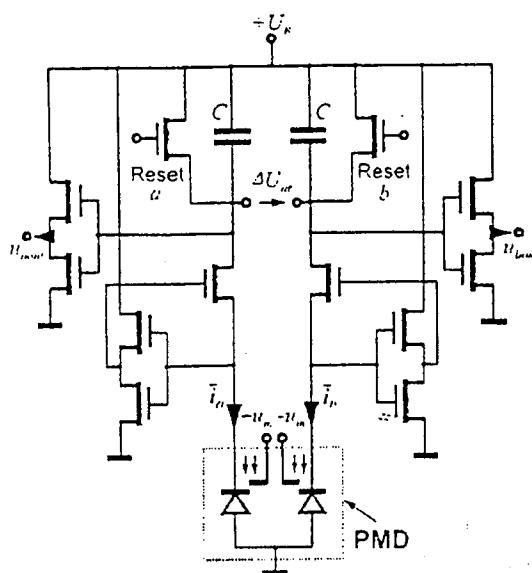


Bild 4. Die Auswerteschaltung liefert die Summen- und Differenzsignale von beiden Photodioden.

lenden Lichtes als auch für die zur Entfernungsmessung notwendige Multiplikation zuständig ist. Zusätzlich zur Ladungsträgererzeugung wird durch Anlegen einer Gegenakt-Modulationsspannung $\pm u_m$ von einigen 100 mV an die beiden Photogates ein Potentialgefälle im darunterliegenden Bereich erzeugt, das die generierten Ladungsträger je nach Polarität entweder zur linken oder zur rechten Auslesediode dirigiert (Bild 3b). Der durch die Modulationsspannungen hervorgerufene zeitlich veränderliche Potentialverlauf entspricht sozusagen einer Elektronenschaukel, die in Abhängigkeit von ihrer momentanen Stellung darüber entscheidet, wohin das erzeugte Elektron fließt. In dieser Ladungsträgerseparation besteht der genannte Mischeffekt. Die Photolöcher driften zur gemeinsamen negativen Anode [4].

Ein Gütekriterium für den elektro-optischen Mischung ist der Verlauf der Modulationskennlinie, die in Abhängigkeit von der Amplitude der Ansteuerspannung den resultierenden Verlauf der gewichteten Ausgangsströme beschreibt. Wie bereits aufgrund der Simulationsergebnisse erwartet, erscheint in der Mitte der Kennlinie ein nahezu linearer Abschnitt, der mit einer Modulationsempfindlichkeit von $1/(200 \text{ mV})$ vorteilhafte Bedingungen für analoge Modulationsspannungen zur Verfügung stellt. Die Modulationskennlinie ist durch Anlegen einer Spitze-zu-Spitze-Spannung von ca. 280 mV komplett durchgesteuert, wodurch eine Ladungsträgerseparation bzw. ein Modulationswirkungsgrad von über 90 % erreicht wird.

Die zur Messung benötigte Lichtquelle braucht nicht kohärent zu sein, es genügt eine LED. Da sie ebenfalls moduliert ist, entscheidet die Laufzeit des ausgesendeten und an der Objektoberfläche reflektierten Lichtes über das zur momentanen Schaukelstellung korrelierte Vorhandensein von photogenerierten Ladungsträgern (Bild 3c). Demgemäß werden laufzeit- bzw. entfernungsabhängige Ladungsträgermengen aus der linken und der rechten Ausle-

diode in die nachgeschaltete Ausleseschaltung (Bild 4) fließen. Durch einfache Differenzbildung dieser beiden Kanäle entsteht ein entfernungsabhängiges Signal. Die Summe beider Kanäle liefert zusätzlich die Gesamtanzahl aller erzeugten Ladungsträger und repräsentiert den bekannten Intensitätswert konventioneller Detektoren.

Die hier innerhalb des Pixels vorliegende Korrelation des modulierten optischen Echoes $P_{\text{opt}}(t - \tau)$ und der Modulationsspannung $u_m(t)$ wird durch die allgemeine Beschreibung in Formel 1 wiedergegeben:

$$\bar{i}_a - \bar{i}_b = \Delta \bar{i}_{ab} = K \int_0^{T_{\text{int}}} P_{\text{opt}}(t - \tau) \cdot u_m(t) dt \quad (1)$$

Im physikalischen Sinne werden die beiden Ausgangsströme \bar{i}_a und \bar{i}_b der Dioden a und b praktisch rückwirkungsfrei unmittelbar auf zwei in die Ausleseschaltung eingefügte Speicherkapazitäten C akkumuliert und erzeugen so nach einer Reset-Phase mit der Integrationszeit T_{int} die beiden Ausgangsspannungen u_a bzw. u_b . Der für diesen Bildpunkt relevante Entfernungswert ergibt sich aus der Differenzspannung ΔU_{ab} :

$$\Delta U_{ab} = \frac{T_{\text{int}}}{C} (\bar{i}_a - \bar{i}_b) \quad (2)$$

Die zusätzlich erzeugte Summenspannung ΣU_{ab} liefert die übliche Pixelhelligkeit, d.h. den Intensitäts- bzw. Grauwert:

$$\Sigma U_{ab} = \frac{T_{\text{int}}}{C} (\bar{i}_a + \bar{i}_b) \quad (3)$$

Die integrierte Mischfunktion weist hohe Bandbreite, hohe Linearität und Dynamik sowie geringe Empfindlichkeit gegenüber Störungen auf. Indem der Photomischdetektor alle Empfängerfunktionen – Lichtintensitätsdetektion, Demodulation bzw. Mischung im quasi-optischen Bereich sowie Korrelation und Signalvorverarbeitung – vereinigt, reduziert er das Bauvolumen gegenüber der konventionellen Lösung nahezu um einen Faktor von 10⁶, wobei gleichzeitig die Kosten und die Fehler der bislang erforderlichen Hochgeschwindigkeits-Empfangselektronik wesentlich vermindert werden.

Optimierung von vielen Parametern

Ausgehend von dieser Grundfunktion wurden diverse PMD-Pixelstrukturen in ein Halbleiterlayout überführt und mit Hilfe aufwendiger, CAE-gestützter Device-Simulationstools im Vorfeld der Fertigung im Detail untersucht und optimiert.

Angestrebt ist eine möglichst hohe Bandbreite. Für eine ausreichende Entfernungsauflösung in typischen industriellen Anwendungen sollten die Modulationsfrequenzen mindestens einige 10 MHz oder sogar 100 MHz betragen. Dazu führt man das PMD am günstigsten in Form einer

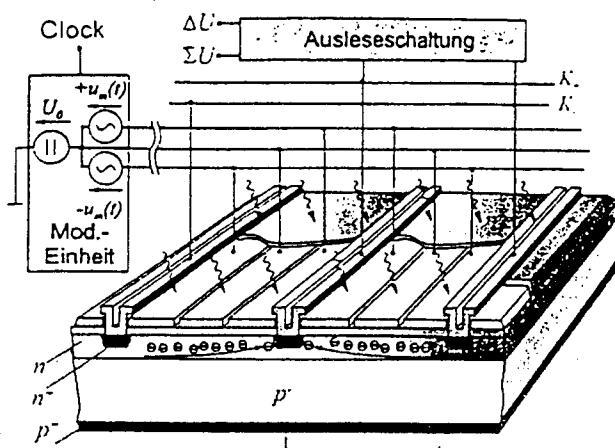


Bild 5. Burried-n-Channel-PMD mit 3-Gate-Fingerstruktur, die einen Betrieb bis zu Frequenzen von etwa 100 MHz ermöglicht.

Fingerstruktur aus, die unabhängig von der gewünschten Pixelgröße und Form immer die höchste Betriebsfrequenz zur Verfügung stellt [5].

Ein Burried-n-Channel-PMD mit 3-Gate-Fingerstruktur, wie es in Bild 5 zu sehen ist, stellt bezüglich Empfindlichkeit, Transfrequenz und Linearität eine solche Optimierung dar. Die photogenerierten Ladungsträger werden mit einem effektiv größeren Potentialgradienten in einem typischerweise 0.1 bis 0.8 μm von der Oberfläche entfernten, sog. vergrabenen Kanal separiert und zu den Auslesedioden transportiert. Diese Vorgehensweise erlaubt einerseits höhere Modulationsfrequenzen und führt andererseits aufgrund stark reduzierter „interface-traps“ zu einer erhöhten Ladungsträger-Transporteffizienz (CTE, charge transfer efficiency). Diese Technik wird heute standardmäßig für CCD-Sensoren angewendet.

Spätestens an dieser Stelle wird deutlich, daß es sich bei einem PMD-Pixel um ein hybrides Bauelement handelt, das sich im lichtempfindlichen Bereich zur Detektion und Mischung (Ladungsträgerseparation) im modifizierten CCD-Betrieb befindet, sich jedoch aufgrund der verwendeten CMOS-Technologie und der pixelweisen aktiven Schaltungsperipherie nach außen hin wie ein APS verhält.

Die Vorteile eines PMD-Sensors werden anhand der Darstellung eines einzigen Pixels deutlich, da die einfache Ausführung dieses Korrelationsempfängers gegenüber einer konventionellen Empfänger-Kette – wie in Bild 2 bereits gezeigt – wesentliche Vorteile bezüglich Stabilität, Platzbedarf und Preis bietet. Diese Vorteile allein rechtfertigen den Aufwand einer solchen Entwicklung. Darüber hinaus ist jedoch durch die erzielte schaltungstechnische Minimallösung die Integration mehrerer paralleler Korrelationsempfänger erst möglich geworden.

PMD-Zeile mit acht Elementen

In Bild 6a ist die Layoutskizze einer PMD-Zeile mit acht PMD-Pixeln dargestellt. Bild 6b zeigt den realen Chip unter dem Mikroskop. Diese Zeile stellt ein Testmuster dar und enthält einen einfachen Analogmultiplexer zum Auslesen der analog nicht vorverarbeiteten 8×2 Signalempfänger. Auf die Mitintegration eines A/D-Umsetzers wurde vorerst verzichtet. Zur Ermittlung der pixelweisen Entfernungsbzw. Grauwerte werden die Differenz- bzw. Summenspannungen extern digitalisiert und geeignet weiterverarbeitet. Die in 0.8- μm -CMOS gefertigte Zeile verwendet hochempfindliche $240 \times 240 \mu\text{m}^2$ große PMD-Pixel, die aus jeweils elf optimierten, kurzkanaligen Grundstrukturen bestehen und einen Füllfaktor von 61 % haben.

Auf Basis des beschriebenen Mischverfahrens wurden die in Bild 7a gezeigten Objekte – übereinanderliegende Päckchen – punkt- bzw. pixelweise vermessen und als Konturbild für zwei in Laufrichtung aufeinanderfolgende Schnittebenen aufgetragen. Bild 7b zeigt das Ergebnis: Das kleine Päckchen wird eindeutig erkannt. Die Entfernungsmessunsicherheit beträgt im eindeutigen Meßbereich von 7.5 m bei einer Modulationsfrequenz von 20 MHz und einer 8-bit-A/D-Wandlung ca. ± 1.5 cm.

Noch in diesem Jahr ist geplant, PMD-basierte Sensoren in Feldversuchen einzusetzen. Auf dieser Basis sollen zunächst Einzelemente und Zeilenstrukturen für erste einfache Industrieanwendungen zur Marktreife entwickelt werden, die es dann in Parallelarbeit erlauben, anspruchsvollere Ziele in Angriff zu nehmen.

Zukünftige CMOS-PMD-Kameras werden Sensoren mit quasi beliebiger Pixelanordnung ermöglichen, die gemein-

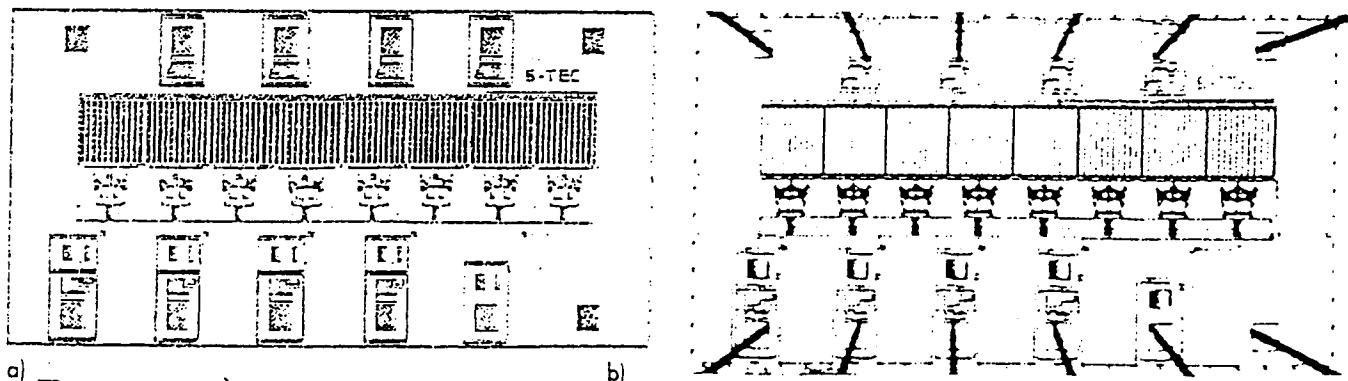


Bild 6. Aufbau eines PMD-Zeilensensors: a) Layoutskizze; b) Chipfoto (realer Chip unter dem Mikroskop).

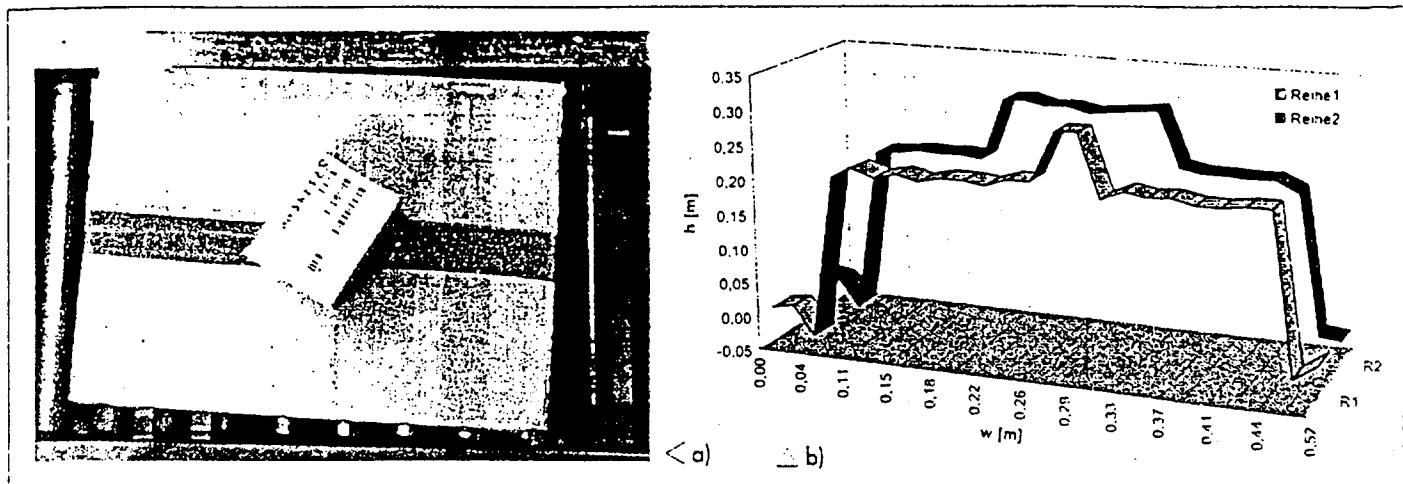


Bild 7. Konkrete Messung mit einem PMD: a) zu erfassende Objekte: ein kleines Päckchen auf einem größeren Paket; b) damit erhaltenes Meßergebnis in zwei verschiedenen Schnittebenen.

sam mit A/D-Wandler, Steuerlogik und digitaler Signalverarbeitung auf einem Chip integriert sein werden.

Weitreichende Perspektiven

Nach den gegenwärtigen Aktivitäten zur Optimierung der PMD-Chip-Leistungsfähigkeit ist die Entwicklung von PMD-Zeilen- und Matrix-Kameras vorgesehen. In Bild 8 ist ein IQ-PMD-Array (Inphase/Quadraturphase) skizziert, das zu einer 3D-Kamera „on a chip“ führt. Die vergrößerte dargestellte Vierfach-Pixelstruktur mit orthogonaler Anordnung ermöglicht eine 3D-Aufnahme mit einem einzigen Lichtblitz, da alle zur eindeutigen Entfernungsbestimmung notwendigen Messungen parallel durchgeführt werden. Dies ist ein besonderer Vorteil zur Reduzierung von Bewegungsunschärfen, wobei jedoch eine Reduzierung der erzielbaren Lateralauflösung um den Faktor 4 in Kauf genommen werden muß. Durch die in Bild 8 angedeutete Integration eines Mikrolinsen-Arrays kann der Füllfaktor für flächenhafte Pixelanordnungen gesteigert werden.

Für die weitere Optimierung – speziell für flächenhafte Sensorfelder mit großer Pixelanzahl und hoher Tiefenauflösung bis in den mm- und Sub-mm-Bereich – wird in Zukunft weiterhin viel Arbeitskraft zu investieren sein. Allerdings kommen die stetigen Entwicklungserfolge der CMOS-APS-Kameras und die Entwicklung der CMOS-Technologie bis zu Strukturgrößen hinein in den Sub- μm -Bereich der Entwicklung des Photomischdetektors zugute.

Im folgenden sind die besonderen Vorteile dieses Konzeptes einer 3D-Laufzeitkamera aufgeführt, die eine Vielzahl einzigartiger Fortschritte und neuer Anwendungen eröffnen:

- Durch die neu gewonnene Funktionalität des PMD ist die Vielfachintegration von Korrelationsdetektoren erst möglich geworden. Hierdurch kann das Bauvolumen, verglichen mit konventionellen Lösungen, um den Faktor 10³ reduziert werden.
- Eine solche Kamera könnte vollständig „on a chip“ in Halbleitertechnik hergestellt werden und in Zukunft bis zu einer Auflösung von einigen 100 000 PMD-Pixeln weiterentwickelt werden.

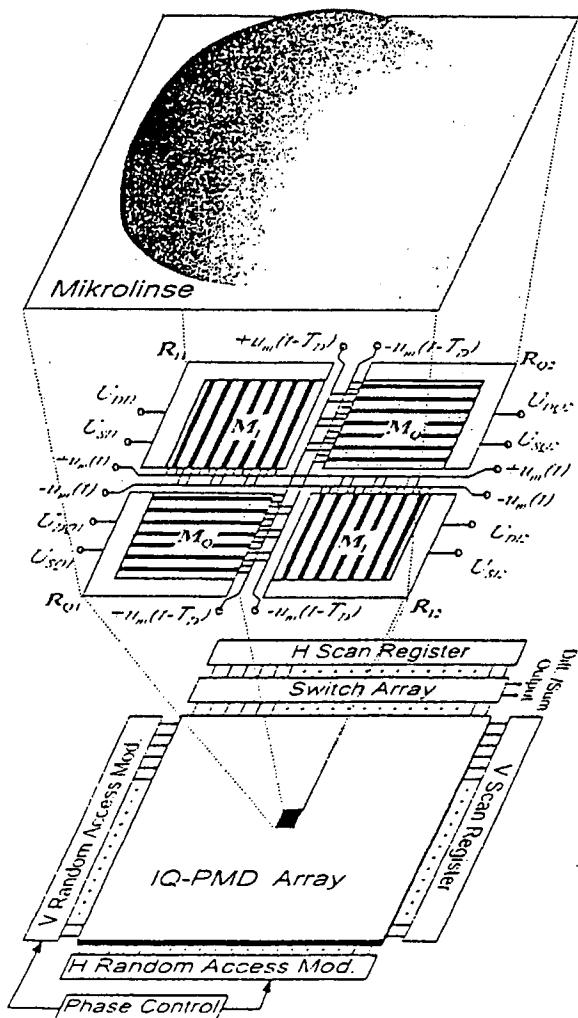


Bild 8. Prinzip eines PMD-Matrixsensors. Alle zur eindeutigen Entfernungsbestimmung notwendigen Messungen werden parallel durchgeführt.

Wichtige denkbare Anwendungen von PMD-Sensoren

Automatisierung:

- Fertigungsintegrierte Qualitätskontrolle und Prozeßsteuerung
- Autonome Fahrzeugnavigation
- „3D-Auge“ für die Roboterhand
- Verkehrsflussteuerung, Ampelkontrolle

Sicherheitstechnik:

- Gefahrenraumüberwachung

- Elektronischer 3D-Rückspiegel
- Insassendetektion, intelligenter Airbag
- Gleisfreimeldung und Fahrdrohüberwachung in der Bahntechnik

Überwachung

und Identifikation:

- Personenidentifikation, Authentizität
- Kontrolle der Zugangsberechtigung

- Fahrzeug-Eigengeschwindigkeits- und Streckenmessung
- Inkohärente Faserkreisel- und Doppler-Geschwindigkeitsmessung
- Identifikation von Fahrzeugen

Digitale 3D-Kamera:

- Interaktive 3D-Kommunikation und Multimedia
- Blitzartige Aufnahme der 3D-Szene

- Digitale 3D-Videokamera, liefert digitalisierte 3D-Bildfolgen
- Medizintechnik, Endoskopie

Außerhalb dieser eher meßtechnisch orientierten Aufgabenstellungen ergeben sich auch mögliche Einsatzgebiete in der optischen Kommunikationstechnik [6].

- Die hohe Integrationsfähigkeit und die Fertigung in Standard-CMOS-Technologie reduzieren gleichzeitig Kosten und Fehler der bislang benötigten Hochgeschwindigkeits-Empfangselektronik.
- Die große Flexibilität und die einfache Handhabbarkeit einer zukünftigen PMD-Kamera sind vergleichbar mit konventionellen 2D-CCD- und CMOS-Kameras.
- Die praktisch nutzbare Modulationsbandbreite könnte mit Hilfe weiter optimierter PMD-Pixelstrukturen bis zu simulierten Werten von einigen 100 MHz erhöht werden, was die erreichbare Entfernungsauslösung weiter steigern würde.

Die neuen Kameras werden so klein, robust, präzise, schnell und kostengünstig werden, daß sie die Tür zu einer Fülle neuer Anwendungen und Lösungen in der automatisierten Fertigung und Qualitätskontrolle, Robotik und Handhabung, in der Verkehrsüberwachung und Navigation sowie in der Identifikation und Sicherheitstechnik öffnen werden. Im Mittelpunkt der derzeitigen Weiterentwicklung steht jedoch für die S-TEC GmbH und ihre Industriepartner die Optimierung erster PMD-Sensoren für industrielle Anwendungen. Daneben wird an der Universität Siegen das neuartige Bauelement in einem DFG-Forschungsprojekt theoretisch gründlich analysiert, modelliert und charakterisiert sowie bzgl. der technologischen Möglichkeiten und Grenzen ausgelotet.

Die Autoren möchten sich bei den Mitarbeitern der Firmen S-TEC und aicoss sowie der beteiligten Institute INV und ZESS der Universität Siegen bedanken. Unabdingbar für den Erfolg war der engagierte Einsatz insbesondere der Herren Dipl.-Ing. Buxbaum, Fricke, Justen, Kleuver, Koscheck, Luen, Ringbeck, Dr. Schulte, Tai, Dr. Xu und Zhang, mit deren Hilfe auch in Zukunft die ehrgeizigen Ziele erreichbar sein werden. Besonderen Dank gebührt Herrn Dr. Hartmann für den Aufbau des Siegener Sensorik-Schwerpunktes und der Hochschulausgründungen aicoss und S-TEC GmbH.

Literatur

- [1] Fossum, E.R.: „Active Pixel Sensors – are CCDs dinosaurs?“ In: CCDs and Optical Sensors II, Proc. SPIE Vol. 1900, S. 2 bis 14, 1993.
- [2] Geib, H.; et al.: Generationswechsel – CMOS statt CCD, *Elektronik* 1998, H. 25, S. 62 bis 68.

[3] Schwarte, R.; et al.: Pseudo-Noise(PN) Laser Radar without Scanner for Extremely Fast 3D-Imaging and -Navigation. *Microwaves and Optonics*, MIOP '97, S. 168 bis 176, Sindelfingen 1997.

[4] Xu, Z.; et al.: Smart pixel – Photonic Mixer Device (PMD). Proc. M2VIP '98 – International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice, S. 259 bis 264, Nanjing 1998.

[5] Schwarte, R.; et al.: Neuartige 3D-Visionsysteme auf der Basis Layout-optimierter PMD-Strukturen. *im Technisches Messen* 1998, H. 7-8, S. 264 bis 271.

[6] Buxbaum, B.; et al.: A new approach in optical broadband communication systems: A highly integrated optical phase locked loop based on a mixing and correlating sensor, the Photonic Mixer Device (PMD). Proc. OPTO 98, S. 59 bis 64, Erfurt 1998.

[7] Schwarte, R.: *Fahren und Vorrichung zur Bestimmung der Phasen- und/oder Amplitudeninformation einer elektromagnetischen Welle*. Deutsche Patentanmeldung DE 197 04 496. Offenlegungstag: 12. 3. 98.



Prof. Dr.-Ing. Rudolf Schwarte studierte Nachrichtentechnik an der RWTH Aachen. Nach seiner Promotion 1972 leitete er als Oberingenieur Fachgruppen auf dem Gebiet der Gbit-Elektronik und der schnellen Impulstechnik. Nach der Mitbegründung der Fa. Sympuls in Aachen wechselte er zu den Firmen Keiper in Kaiserslautern und Mielec in Ottobrunn, wo er in leitender Stellung tätig war. 1982 erfolgte der Ruf an das Institut für Nachrichtenverarbeitung der Universität Siegen, wo er 1988 das Zentrum für Sensorsysteme (ZESS) initiierte und den Vorsitz vorsitz übernahm. Hier leitete er die Forschungsschwerpunkte insbesondere auf dem Gebiet der optischen Meßtechnik, woraus die Gründung der Fa. S-TEC hervorging.

Dipl.-Ing. Horst G. Heinol studierte Elektrotechnik an der FH Frankfurt und der Universität Siegen. Während seiner Industrietätigkeit beim Battelle-Institut und der Deutschen Aerospace Dornier GmbH arbeitete er an Verbundprojekten der ESA zur Entwicklung kohärenz-optischer Übertragungssysteme für die Satellitenkommunikation. Seit 1996 ist er auf dem Gebiet der optischen Meßtechnik als wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für Nachrichtentechnik der Uni Siegen tätig, wo er sich mit der Entwicklung von laufzeitbasierten 3D-Kamerasystemen beschäftigt. Seit 1997 ist er Geschäftsführer der Fa. S-TEC.

